不同水平无机及有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

薛　颖　董晓芳* 佟建明

(中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，北京 100193)

摘　要：本试验旨在研究不同水平无机及有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响。选取 990 只 22 周龄的京红 1 号蛋鸡，随机分为 11 组，每组 6 个重复，每个重复 15 只鸡。1 组为对照组，试验组分别在饲粮中按 NRC（1994）推荐需要量的 25%、50%、75%、100%、125%添加不同水平的无机（2~6 组）或有机复合微量元素（7~11 组），其中锰（Mn）、铁（Fe）、锌（Zn）、硒（Se）添加水平参照蛋鸡 NRC（1994）标准，铜（Cu）添加水平参照肉鸡 NRC（1994）标准。试验期 24 周。结果表明：1）添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%无机复合微量元素极显著提高了蛋鸡的血浆总超氧化物歧化酶（T-SOD）活性（$P<0.01$）；添加 NRC 推荐需要量的 100%、125%无机复合微量元素极显著提高了血浆谷胱甘肽过氧化物歧化酶（GSH-Px）活性（$P<0.01$）；添加 NRC 推荐需要量的 125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 8 周和第 24 周时血浆总抗氧化能力（T-AOC）（$P<0.01$）；添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%无机复合微量元素极显著降低了试验第 16 周时血浆丙二醛（MDA）含量（$P<0.01$）。2）添加不同水平的有机复合微量元素均极显著提高了试验第 8 周时蛋鸡的血浆 T-AOC，试验第 4 周、第 8 周和第 16 周时血浆 T-SOD 活性和试验第 16 周时血浆 GSH-Px 活性（$P<0.01$）；添加 NRC 推荐需要量的 50%、75%、100%、125%有机复合微量元素极显著降低了试验第 4 周和第 16 周时血浆 MDA 含量（$P<0.01$）。3）NRC 推荐需要量的 75%水平时，试验第 8 周，有机组血浆 T-AOC 显著高于无机组（$P<0.05$）；试验第 16 周和第 24 周，有机组血浆 GSH-Px 活性显著高于无机组（$P<0.05$）。NRC 推荐

收稿日期：2016-01-21

基金项目：国家蛋鸡产业技术体系建设专项经费（CARS-41-K16）；中国农业科学院科技创新工程（ASTIP-IAS08）

作者简介：薛　颖（1989-），女，内蒙古乌兰察布人，硕士研究生，从事蛋鸡营养与饲料科学研究。E-mail: scxyhappy@163.com

*通信作者：董晓芳，副研究员，硕士生导师，E-mail: xiaofangd1124@sina.com

需要量的125%水平时，试验第16周，有机组血浆T-SOD活性显著高于无机组（$P<0.05$）。试验表明，蛋鸡饲粮中添加NRC推荐需要量的75%以上无机复合微量元素有利于提高血浆的抗氧化能力；蛋鸡饲粮中添加NRC推荐需要量的25%、50%有机复合微量元素有利于提高血浆的抗氧化能力；在NRC推荐需要量的75%、125%水平时，有机复合微量元素对蛋鸡抗氧化能力的提高效果优于无机复合微量元素。

关键词：无机微量元素；有机微量元素；产蛋鸡；抗氧化能力

中图分类号：S816.72；S831　　　文献标识码：A　　　文章编号：

微量元素是多种酶的构成成分和活性中心，能调节或激活酶的活性，调控能量、蛋白质等养分在动物体内的代谢过程，调控机体内分泌。微量元素锌（Zn）、铜（Cu）、锰（Mn）是过氧化物歧化酶（SOD）的活性组成成分，同时这些微量元素也会影响非酶抗氧化蛋白的生成（如谷胱甘肽、铜蓝蛋白）。Rotruck等[1]于1973年发现硒（Se）是谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）的必需组成成分，从而揭示了Se的抗氧化功能。动物Zn、Cu和Mn的营养状况影响机体的抗氧化能力。总抗氧化能力（T-AOC）是衡量机体抗氧化能力的综合指标，是体内抗氧化酶体系和抗氧化物质体系中抗氧化能力的总和。丙二醛（MDA）是自由基和脂质过氧化的主要产物，血液中MDA含量的高低间接反映了机体细胞受到自由基攻击的严重程度。总超氧化物歧化酶（T-SOD）则广泛分布于机体的组织细胞内，其活性的高低间接反映了机体清除自由基的能力，同时可作为判断体内Zn、Cu和Mn营养状况的指标之一。GSH-Px特异性催化还原型谷胱甘肽对过氧化物的还原反应，而Se作为该酶的活性中心，动物缺Se时该酶的活性降低，机体的抗氧化能力下降[1-2]。综上所述，动物微量元素的营养状况对动物机体的抗氧化能力起着非常重要的作用，而复合微量元素的添加量及添加形式也是影响机体抗氧化能力的重要因素。因此，本试验主要通过在蛋鸡饲粮中添加不同水平的无机及有机复合微量元素，研究其对血浆中T-AOC，MDA含量，T-SOD、GSH-Px活性的影响，为进一步合理确定复合微量元素的添加量提供一定的试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所需无机及有机微量元素种类及规格见表 1。

表 1 无机及有机微量元素种类及规格

Table 1 The varieties and specifications of inorganic and organic trace elements

微量元素 Trace element	无机微量元素 Inorganic trace elements	有机微量元素 Organic trace elements
锰 Mn	一水硫酸锰（31.8%）	羟基氨基酸锰（13.0%）
铁 Fe	一水硫酸亚铁（30.0%）	甘氨酸铁（17.0%）
铜 Cu	五水硫酸铜（25.0%）	羟基氨基酸铜（15.0%）
锌 Zn	一水硫酸锌（35.0%）	羟基氨基酸锌（16.0%）
硒 Se	亚硒酸钠（1.0%）	酵母硒（0.2%）

1.2 试验动物及基础饲粮

试验动物选用 990 只 22 周龄京红 1 号开产蛋鸡。试验基础饲粮以玉米、豆粕和棉籽粕为主要原料，不添加微量元素，参考 NRC（1994）蛋鸡营养需要确定营养水平，基础饲粮组成及营养水平见表 2。

表 2 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 2 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米 Corn	64.00
豆粕 Soybean meal	21.00
棉籽粕 Cottonseed meal	3.00

豆油 Soybean oil	1.00
石粉 Limestone	8.50
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.20
食盐 NaCl	0.30
预混料 Premix[1)]	1.00
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]	
代谢能 ME/(MJ/kg)	11.49
总能 GE/(MJ/kg)	14.59
干物质 DM	88.94
粗纤维 CF	3.07
粗蛋白质 CP	16.92
粗脂肪 EE	13.90
粗灰分 Ash	14.30
钙 Ca	3.72
总磷 TP	0.58
有效磷 AP	0.39
蛋氨酸 Met	0.36
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.65
赖氨酸 Lys	0.85

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 Premix provided the following per kg of diets：VA 7 500 IU，VD_3 2 500 IU，VE 15 IU，VK_2 2 mg，VB_1 2 mg，VB_2 4 mg，VB_6 4 mg，VB_{12} 0.01 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 5 mg，烟酸 nicotinic acid 20 mg，叶酸 folic acid 1 mg，生物素 biotin 0.2 mg。

2）总能、干物质、粗纤维、粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分为实测值，其余为计算值。GE, DM, CF, CP, EE, ash were measured values, while the others were calculated values.

1.3 试验设计与饲养管理

选取 990 只 22 周龄的京红 1 号蛋鸡，随机分为 11 组，每组 6 个重复，每个重复 15 只鸡。1 组为对照组，饲粮中不添加复合微量元素[Mn、铁（Fe）、Cu、Zn、Se]；2~6 组分别添加复合无机微量元素，7~11 组分别添加复合有机微量元素，添加水平分别为 NRC（1994）推荐需要量的 25%、50%、75%、100%、125%，其中 Mn、Fe、Zn、Se 添加水平参照蛋鸡 NRC（1994）标准，Cu 添加水平参照肉鸡 NRC（1994）标准。各组饲粮中微量元素添加水平与实测值见表 3。试验期为 24 周。

表 3 饲粮中微量元素添加水平与实测值

Table 3 Supplemental levels and measured values of trace elements in diets mg/kg

组别	添加水平 Supplemental levels					实测值 Measured values				
Groups	Mn	Fe	Cu	Zn	Se	Mn	Fe	Cu	Zn	Se
1	0	0	0	0	0	23.29	209.57	5.78	29.28	0.03
2	5	11.25	1.5	8.5	0.012 5	27.69	220.99	6.46	37.07	0.04
3	10	22.50	3.0	17.0	0.025 0	30.96	232.68	7.49	46.17	0.05
4	15	33.75	4.5	25.5	0.037 5	38.85	246.02	9.07	54.70	0.06
5	20	45.00	6.0	34.0	0.050 0	43.57	257.66	10.41	62.70	0.07
6	25	56.25	7.5	42.5	0.062 5	50.19	274.28	11.77	72.75	0.09
7	5	11.25	1.5	8.5	0.012 5	28.11	192.95	6.48	38.15	0.04
8	10	22.50	3.0	17.0	0.025 0	34.00	205.51	7.49	45.06	0.05
9	15	33.75	4.5	25.5	0.037 5	38.30	210.00	8.95	53.11	0.06
10	20	45.00	6.0	34.0	0.050 0	43.19	214.84	10.33	62.03	0.07

11	25	56.25	7.5	42.5	0.062 5	47.48	228.52	11.32	72.18	0.09

1 组：对照组；2~6 组：NRC 推荐需要量的 25%、50%、75%、100%、125%无机复合微量元素；7~11 组：NRC 推荐需要量的 25%、50%、75%、100%、125%有机复合微量元素。下表同。

Group 1: the control group. Groups 2 to 6: inorganic trace elements at 25%, 50%, 75%, 100%, 125% of requirements NRC recommended. Groups 7 to 11: organic trace elements at 25%, 50%, 75%, 100%, 125% of requirements NRC recommended. The same as below.

饲养试验在中国农业科学院北京畜牧兽医研究所昌平试验基地进行，采用 3 层层叠式笼养，每笼 3 只鸡，每日喂料 3 次，自由采食和饮水。采用光照程序控制器控制，光照 16 h，自动控温、供暖、通风。

1.4 测定指标

1.4.1 饲粮微量元素含量

采取饲粮样品约 1 kg，采用四分法取样约 500 g，用粉碎机粉碎过 40 目筛，置于封口袋中阴凉干燥处密封保存，待测。样品前处理采用美国 CEM 高通量密闭消解系统（CEM-MARS 5）。称取饲粮样品 0.10~0.15 g 置于消化管中，加入硝酸 6 mL 预消解 1 h。再加入 2 mL 双氧水，待反应 30 min 后将消化管盖拧开排出气体，盖紧管盖后将消解管对称放置于转盘上。反应管装好后将转盘安放于仪器腔体中，编辑方法，按 start/pause 键开始消解程序。消解程序完成后，将消解管取出置于电热消解器赶酸 45~50 min，冷却后使用超纯水定容稀释 500 倍。将处理好的样品溶液使用电感耦合等离子体质谱仪（Agilent 7700 ICP-MS）进行 Mn、Fe、Cu、Zn、Se 微量元素含量的检测。

1.4.2 抗氧化能力指标

试验期间，每 4 周以重复为单位每个重复随机选取 2 只鸡静脉真空采集血液，分离保存血浆，待测。采用双光束紫外可见光分光光度计（TU-1901)测定血浆 T-AOC，MDA 含量，T-SOD、GSH-Px 活性，测定所用试剂盒购自南京建成生物工程研究所，测定过程严格参照

试剂盒说明书进行。

1.5 数据处理与分析

不同水平间无机或有机复合微量元素对血浆抗氧化能力的影响采用 SAS 9.2 软件 ANOVA 程序进行方差分析，用 Duncan 氏法进行组间多重比较，同一水平下无机与有机复合微量元素对血浆抗氧化能力的影响采用 t 检验进行分析，以 $P<0.05$ 为差异显著水平。试验结果以“平均值（Means）±标准差（SD）”来表示。

2 结 果

2.1 不同水平无机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

由表 4 可知，以无机形式添加复合微量元素时，与对照组相比，添加 NRC 推荐需要量的 25%、50%、75%、125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 8 周时蛋鸡血浆 T-AOC（$P<0.01$），添加 NRC 推荐需要量的 125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 24 周时蛋鸡血浆 T-AOC（$P<0.01$）。添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%无机复合微量元素极显著降低了试验第 16 周时蛋鸡血浆 MDA 含量($P<0.01$)。添加 NRC 推荐需要量的 50%、75%、100%、125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 8 周、第 16 周时蛋鸡的血浆 T-SOD 活性（$P<0.01$），添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 4 周、第 24 周时蛋鸡的血浆 T-SOD 活性（$P<0.01$）。添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 8 周、第 16 周时蛋鸡的血浆 GSH-Px 活性（$P<0.01$），添加 NRC 推荐需要量的 100%、125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 4 周、第 24 周时蛋鸡的血浆 GSH-Px 活性（$P<0.01$）。

2.2 不同水平有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

由表 5 可知，以有机形式添加复合微量元素时，与对照组相比，添加不同水平的有机复合微量元素均极显著提高了试验第 8 周时蛋鸡血浆 T-AOC（$P<0.01$），添加 NRC 推荐需要量的 100%有机复合微量元素显著提高了试验第 16 周时蛋鸡血浆 T-AOC（$P<0.05$）。添加

不同水平的有机复合微量元素均极显著降低了试验第 4 周时蛋鸡的血浆 MDA 含量（$P<0.01$），添加 NRC 推荐需要量的 50%、75%、100%、125%有机复合微量元素极显著降低了试验第 16 周时蛋鸡的血浆 MDA 含量（$P<0.01$）。在各试验期，添加不同水平的有机复合微量元素均极显著提高了蛋鸡的血浆 T-SOD 活性（除试验第 24 周时添加 NRC 推荐需要量的 25%有机复合微量元素外）（$P<0.01$）。添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%有机复合微量元素极显著提高了试验第 4 周时蛋鸡的血浆 GSH-Px 活性（$P<0.01$），添加不同水平的有机复合微量元素均极显著提高了试验第 16 周时蛋鸡的血浆 GSH-Px 活性（$P<0.01$），添加 NRC 推荐需要量的 100%、125%有机复合微量元素极显著提高了试验第 24 周时蛋鸡的血浆 GSH-Px 活性（$P<0.01$）。

2.3 同一水平无机及有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

由表 6 可知，NRC 推荐需要量的 75%水平时，试验第 8 周，有机组血浆 T-AOC 显著高于无机组（$P<0.05$）；试验第 16 周、第 24 周，有机组血浆 GSH-Px 活性显著高于无机组（$P<0.05$）。NRC 推荐需要量的 125%水平时，试验第 16 周，有机组血浆 T-SOD 活性显著高于无机组（$P<0.05$）。试验其余添加水平时，无机组与有机组的 T-AOC，MDA 含量，T-SOD、GSH-Px 活性差异均不显著（$P>0.05$）。

3 讨 论

3.1 不同水平无机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

T-AOC 是衡量机体抗氧化能力的综合指标，当自由基攻击生物膜中的多不饱和脂肪酸时，引发脂质过氧化作用而产生脂质过氧化物，脂质过氧化物在组织内的累积会导致机体组织的不可逆损害[3]。MDA 是自由基和脂质过氧化的主要产物，血液中 MDA 含量的高低间接反映了机体细胞受到自由基攻击的严重程度。GSH-Px、T-SOD 等构成了机体抗氧化应激的屏障[4]。T-SOD 广泛分布于机体的组织细胞内, 是机体清除氧离子自由基的一种酶，保护细胞免受损伤，T-SOD 活性的高低间接反映了机体清除自由基的能力, 同时作为判断机体内

Mn、Cu、Zn 营养状况的指标之一。GSH-Px 特异性催化还原型谷胱甘肽对过氧化物的还原反应，催化过氧化物转化为无毒性产物，从而保护细胞膜的结构和功能免受过氧化物的干扰和损害，而 Se 作为该酶的活性中心，Se 的含量直接影响其活性的高低[5]。Gao 等[6]和王洪阳等[7]研究结果表明，饲粮中添加 Zn 可显著提高动物体内血清中铜锌超氧化物歧化酶（CuZn-SOD）活性，且其活性随饲粮中 Cu 添加量的增加而提高。王淑梅等[8]研究结果表明，蛋鸭血清中锰超氧化物歧化酶（Mn-SOD）活性随饲粮中 Mn 添加量的增加而显著提高。潘翠玲等[9]研究结果表明，蛋鸡血液中 GSH-Px 活性随饲粮中 Se 添加量的增加而提高。本试验结果表明，添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%无机复合微量元素极显著提高了蛋鸡的血浆 T-SOD 活性，添加 NRC 推荐需要量的 100%、125%无机复合微量元素极显著提高了血浆 GSH-Px 活性，这与以上研究结果一致。此外，添加 NRC 推荐需要量的 125%无机复合微量元素极显著提高了试验第 8 周和第 24 周时蛋鸡血浆 T-AOC，添加 NRC 推荐需要量的 75%、100%、125%无机复合微量元素极显著降低了试验第 16 周时的血浆 MDA 含量。由此说明，添加 NRC 推荐需要量 75%以上的无机复合微量元素有利于提高蛋鸡的血浆抗氧化能力。

3.2　不同水平有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

有关有机复合微量元素对血浆抗氧化能力影响的研究报道指出，氨基酸螯合微量元素显著提高生长肥育猪的肝脏 T-SOD 活性及血清 GSH-Px 活性，降低 MDA 含量[10]。本试验结果表明，添加不同水平的有机复合微量元素均极显著提高了试验第 8 周时蛋鸡血浆 T-AOC，试验第 4 周、第 8 周和第 16 周时血浆 T-SOD 活性和试验第 16 周时血浆 GSH-Px 活性；添加 NRC 推荐需要量的 50%、75%、100%、125%有机复合微量元素极显著降低了试验第 4 周和第 16 周时血浆 MDA 含量，与以上结果基本一致。由此说明，添加 NRC 推荐需要量的 25%、50%有机复合微量元素有利于提高蛋鸡血浆的抗氧化能力。

3.3　同一水平无机及有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

本试验结果表明，NRC 推荐需要量的 75%水平时，试验第 8 周，有机组血浆 T-AOC 显著高于无机组；试验第 16 周和第 24 周，有机组血浆 GSH-Px 活性显著高于无机组。NRC 推荐需要量的 125%水平时，试验第 16 周，有机组血浆 T-SOD 活性显著高于无机组。这是由于有机微量元素具有重要的体内代谢优越性[11]，它们会以完整的形式被吸收，从而减少与易氧化营养元素发生催化氧化作用，从而在此过程中可提高动物消化道某些酶的活性，在体内被吸收后更加易于转运，可直接作用于靶器官并参与体内的生化反应[12]。因此，有机微量元素较无机微量元素在提高机体抗氧化能力方面更具优势。综上，当饲粮中微量元素的添加水平较低时，无机与有机复合微量元素的效果相当；但当添加水平增加，有机复合微量元素的作用效果要优于无机复合微量元素；说明饲粮中添加高水平的微量元素时，会导致无机微量元素的吸收率降低，而对有机微量元素无显著影响。由此说明，在 NRC 推荐需要量的 75%、125%水平时，有机复合微量元素提高蛋鸡血浆抗氧化能力的效果优于无机复合微量元素。

4 结 论

① 以无机复合微量元素形式添加时，蛋鸡饲粮中添加 NRC 推荐需要量的 75%以上有利于提高血浆的抗氧化能力。

② 以有机复合微量元素形式添加时，蛋鸡饲粮中添加 NRC 推荐需要量的 25%、50%有利于提高血浆的抗氧化能力。

③ 对比相同添加水平的无机及有机复合微量元素，在 NRC 推荐需要量的 75%、125%水平时，有机复合微量元素对蛋鸡抗氧化能力的提高效果优于无机复合微量元素。

表 4　不同水平无机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

Table 1　Effects of inorganic complex trace elements at different levels on the plasma antioxidant activities of laying hens

项目 Items	试验阶段 Trial period/周	组别 Groups						P 值 *P*-value
		1	2	3	4	5	6	
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	4	6.23±0.41	6.11±0.5	5.62±0.75	5.90±0.46	6.01±0.41	6.08±0.34	0.389 4
	8	5.30±0.35^{Cd}	6.50±0.29^{Aab}	6.72±0.35^{Aa}	6.09±0.24^{ABbc}	5.79±0.6^{BCc}	6.57±0.32^{Aa}	<0.000 1
	16	6.34±0.19	6.27±0.31	6.37±0.28	6.50±0.21	6.44±0.25	6.37±0.14	0.644 7
	24	6.17±0.27^{Bb}	6.44±0.21^{ABa}	6.46±0.26^{ABa}	6.48±0.17^{ABa}	6.44±0.21^{ABa}	6.71±0.17^{Aa}	0.009 5
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	4	7.8±0.71	7.27±1.13	6.77±1.15	6.52±1.16	6.69±1.54	6.50±1.74	0.461 0
	8	6.76±2.31	6.33±1.86	6.06±1.64	6.78±2.56	5.02±1.32	5.81±1.04	0.583 6
	16	7.3±0.63^{Aa}	6.36±0.51^{ABb}	6.31±0.78^{ABb}	5.99±0.96^{Bbc}	5.82±1.04^{Bbc}	5.29±0.49^{Bc}	0.003 0
	24	6.84±0.44	6.27±0.40	5.96±0.27	5.54±0.41	5.98±0.20	5.41±0.59	0.979 4

总超氧化物歧化酶 T-SOD/（U/mL)	4	223.32±18.04^{Cc}	239.66±18.37^{ABCbc}	233.66±16.33^{BCc}	264.17±11.88^{Aa}	262.37±22.15^{Aa}	257.18±11.27^{ABab}	0.000 5
	8	218.20±16.62^{De}	238.64±18.51^{CDd}	255.11±10.02^{BCcd}	259.91±10.46^{ABCbc}	285.85±21.05^{Aa}	275.56±15.45^{ABab}	<0.000 1
	16	226.53±24.04^{Cd}	245.58±10.27^{BCc}	251.98±15.40^{Bbc}	267.97±8.72^{ABab}	279.70±18.42^{Aa}	267.57±7.34^{ABab}	<0.000 1
	24	213.87±16.17^{Cd}	215.37±16.83^{Cc}	240.23±14.25^{BCbc}	252.87±20.09^{ABab}	266.32±12.70^{ABa}	270.53±22.28^{Aab}	<0.000 1
谷胱甘肽过氧化物歧化酶 GSH-Px/(U/mL)	4	3 009.52±211.68^{Bb}	3 142.86±245.04^{ABab}	3 293.65±269.94^{ABab}	3 374.6±241.06^{ABab}	3 487.3±194.19^{Aa}	3 517.46±167.43^{Aa}	0.002 7
	8	28 661.29±1 831.48^{Dd}	30 467.74±2 895.74^{CDcd}	32 483.87±1 433.65^{BCDc}	33 709.68±3 915.07^{ABCbc}	36 758.06±1 667.68^{ABab}	37 935.48±3 522.90^{Aa}	<0.000 1
	16	29 806.45±3 111.86^{Cc}	30 822.58±2 072.64^{BCc}	32 225.81±1 705.98^{ABCbc}	34 693.55±3 375.05^{ABab}	34 209.68±2 460.24^{ABab}	35 612. 90±1 868.52^{Aa}	0.001 7
	24	31 879.31±1 091.69^{Cb}	33 517.24±1 380.17^{BCb}	32 948.28±1 558.95^{Cb}	32 862.07±1 876.57^{Cb}	35 913.79±1 357.37^{ABa}	36 482.76±2 100.45^{Aa}	<0.000 1

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著($P>0.05$)，不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)，不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$), while with different small letter superscripts mean

significant difference (P <0.05), and with different capital letter superscripts mean significant difference (P<0.01). The same as below.

表 5 不同水平有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

Table 2 Effects of organic complex trace elements at different levels on the plasma antioxidant activities of laying hens

项目 Items	试验阶段 Trial period/周	组别 Groups 1	7	8	9	10	11	*P* 值 *P*-value
总抗氧化能	4	6.23±0.41^{ABCbc}	5.78±0.40^{Cc}	6.12±0.37^{BCbc}	6.85±0.40^{Aa}	6.71±0.37^{ABa}	6.43±0.26^{ABab}	0.000 3
力	8	5.30±0.35^{Cc}	6.23±0.41^{Bb}	7.05±0.35^{Aa}	6.29±0.67^{Bb}	6.52±0.45^{ABab}	6.57±0.21^{ABab}	<0.000 1
T-AOC/(U/	16	6.34±0.19^{b}	6.70±0.17^{ab}	6.61±0.21^{ab}	6.61±0.24^{ab}	6.77±0.21^{a}	6.66±0.22^{ab}	0.025 2
mL)	24	6.17±0.27	6.27±0.31	6.53±0.13	6.45±0.33	6.51±0.19	6.49±0.30	0.126 0
丙二醛	4	7.800.71^{Aa}	6.25±1.15^{Bb}	5.99±1.00^{Bb}	5.73±1.10^{Bb}	5.85±0.86^{Bb}	5.83±0.71^{Bb}	0.005 2
MDA/(nmol/	8	6.76±2.31	6.46±1.54	6.47±3.64	6.19±3.02	5.85±1.90	5.36±2.48	0.946 1
mL)	16	7.30±0.63^{Aa}	6.29±0.54^{ABb}	5.82±0.84^{Bb}	5.69±0.71^{Bb}	5.70±0.79^{Bb}	5.42±0.77^{Bb}	0.001 3

	24	6.84±0.44	6.31±0.69	5.84±0.68	5.74±0.35	5.84±0.33	5.88±0.80	0.851 3
总超氧化物歧化酶 T-SOD/（U/mL)	4	223.32±18.04^{Bb}	260.78±17.28^{Aa}	268.77±14.53^{Aa}	264.77±21.50^{Aa}	279.10±14.11^{Aa}	277.10±15.56^{Aa}	<0.000 1
	8	218.20±16.62^{Cd}	257.44±14.50^{Bc}	263.76±13.54^{ABbc}	281.32±12.53^{ABab}	289.42±14.40^{Aa}	290.11±21.04^{Aa}	<0.000 1
	16	226.53±24.04^{Bc}	264.24±14.39^{Ab}	272.50±10.71^{Aab}	274.10±21.41^{Aab}	292.09±10.67^{Aa}	293.02±24.67^{Aa}	<0.000 1
	24	213.87±16.17^{Dd}	238.19±15.26^{CDc}	245.35±18.05^{BCc}	252.73±6.46^{ABCbc}	276.38±18.68^{Aa}	271.49±19.27^{ABab}	<0.000 1
谷胱甘肽过氧化物歧化酶 GSH-Px/(U/mL)	4	3 009.52±211.68^{Cc}	3 055.56±291.15^{Cc}	3 330.16±200.83^{BCbc}	3 430.16±191.56^{ABab}	3 646.03±182.44^{ABab}	3 726.98±164.26^{Aa}	<0.000 1
	8	28 661.29±1 831.48	30 258.06±5 671.88	28 903.23±2 551.37	30 596.77±2 982.41	33 435.48±3 384.47	31 967.74±2 848.96	0.164 8
	16	29 806.45±3 111.86^{Bc}	34 096.77±2 289.00^{Aab}	33 290.32±2 002.08^{Ab}	35 564.52±1 186.42^{Aab}	35 467.74±1 358.64^{Aab}	36 177.42±1 894.81^{Aa}	<0.000 1
	24	31 879.31±1 091.69^{Bd}	33 000.00±2 145.15^{ABcd}	34 931.03±3 442.99^{ABabc}	33 8277.59±581.52^{ABbcd}	35 982.76±2 592.75^{Aab}	36 655.17±1 583.36^{Aa}	0.004 2

表 6　无机及有机复合微量元素对蛋鸡血浆抗氧化能力的影响

Table 6 Effects of inorganic and organic complex trace elements on the plasma antioxidant activities of laying hens

项目 Items	试验阶段 Trial period/周	NRC 推荐需要量的 25% 25% of NRC recommended levels		NRC 推荐需要量的 50% 50% of NRC recommended levels		NRC 推荐需要量的 75% 75% of NRC recommended levels		NRC 推荐需要量的 100% 100% of NRC recommended levels		NRC 推荐需要量的 125% 125% of NRC recommended levels	
		无机组 Inorganic group	有机组 Organic group	无机组 Inorganic group	有机组 Organic group	无机组 Inorganic group	有机组 Organic group	无机组 Inorganic group	有机组 Organic group	无机组 Inorganic group	有机组 Organic group
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	4	6.11±0.50	5.78±0.40	5.62±0.75	6.12±0.37	5.90±0.46	6.85±0.40	6.01±0.41	6.71±0.37	6.08±0.34	6.43±0.26
	8	6.50±0.29	6.23±0.41	6.72±0.35	7.05±0.35	6.09±0.24[b]	6.29±0.67[a]	5.79±0.6	6.52±0.45	6.57±0.32	6.57±0.21
	16	6.27±0.31	6.70±0.17	6.37±0.28	6.61±0.21	6.50±0.21	6.61±0.24	6.44±0.25	6.77±0.21	6.37±0.14	6.66±0.22
	24	6.44±0.21	6.27±0.31	6.46±0.26	6.53±0.13	6.48±0.17	6.45±0.33	6.44±0.21	6.51±0.19	6.71±0.17	6.49±0.30
丙二醛	4	7.27±1.13	6.25±1.15	6.77±1.15	5.99±1.00	6.52±1.16	5.73±1.10	6.69±1.54	5.85±0.86	6.5±1.74	5.83±0.71

MDA/(nmol/mL)	8	6.33±1.86	6.46±1.54	6.06±1.64	6.47±3.64	6.78±2.56	6.19±3.02	5.02±1.32	5.85±1.90	5.81±1.04	5.36±2.48
	16	6.36±0.51	6.29±0.54	6.31±0.78	5.82±0.84	5.99±0.96	5.69±0.71	5.82±1.04	5.70±0.79	5.29±0.49	5.42±0.77
	24	6.27±0.40	6.31±0.69	5.96±0.27	5.84±0.68	5.54±0.41	5.74±0.35	5.98±0.20	5.84±0.33	5.41±0.59	5.88±0.80
总超氧化物歧化酶 T-SOD/（U/mL）	4	239.66±18.37	260.78±17.28	233.66±16.33	268.77±14.53	264.17±11.88	264.77±21.50	262.37±22.15	279.10±14.11	257.18±11.27	277.10±15.56
	8	238.64±18.51	257.44±14.50	255.11±10.02	263.76±13.54	259.91±10.46	281.32±12.53	285.85±21.05	289.42±14.40	275.56±15.45	290.11±21.04
	16	245.58±10.27	264.24±14.39	251.98±15.40	272.50±10.71	267.97±8.72	274.10±21.41	279.70±18.42	292.09±10.67	267.57±7.34[b]	293.02±24.67[a]
	24	215.37±16.83	238.19±15.26	240.23±14.25	245.35±18.05	252.87±20.09	252.73±6.46	266.32±12.70	276.38±18.68	270.53±22.28	271.49±19.27
谷胱甘肽过氧化物歧化酶 GSH-Px/（U/mL）	4	3 142.86±245.04	3 055.56±291.15	3 293.65±269.94	3 330.16±200.83	3 374.6±241.06	3 430.16±191.56	3 487.3±194.19	3 646.03±182.44	3 517.46±167.43	3 726.98±164.26
	8	30 467.74±2 895.74	30 258.06±5 671.88	32 483.87±1 433.65	28 903.23±2 551.37	33 709.68±3 915.07	30 596.77±2 982.41	36 758.06±1 667.68	33 435.48±3 384.47	37 935.48±3 522.90	31 967.74±2 848.96
	16	30 822.58±2 072.64	34 096.77±2 289.00	32 225.81±1 705.98	33 290.32±2 002.08	34 693.55±3 375.05[b]	35 564.52±1 186.42[a]	34 209.68±2 460. 24	35 467.74±1 358.64	35 612. 90±1 868. 52	36 177.42±18 94.81

24	33 517.24±1 380.17	33 000.00±2 145.15	32 948.28±1 558.95	34 931.03±3 442.99	32 862.07±1 876.57[b]	33 8277.59±581.52[a]	35 913.79±1 357.37	35 982.76±2 592.75	36 482.76±2 100.45	36 655.17±1 583.36

参考文献：

[1] ROTRUCK J T,POPE A L,GANTHER H E,et al.Selenium:biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J].Science,1973,179(4073):588–590.

[2] FANG Y Z,YANG S,WU G Y.Free radicals,antioxidants,and nutrition[J].Nutrition,2002,18(10):872–879.

[3] 陈会良,蔡汉乔.中草药添加剂对肉鸡抗氧化能力和红细胞免疫功能的影响[J].中国饲料,2006(3):17–18,25.

[4] NIA A B,VAN SCHOOTEN F J,SCHILDERMAN P A E L,et al.A multi-biomarker approach to study the effects of smoking on oxidative DNA damage and repair and antioxidative defense mechanisms[J].Carcinogenesis,2001,22(3):395–401.

[5] CANTOR A H,STRAW M L,FORD M J,et al.Effect of feeding organic selenium in diets of laying hens on egg selenium content[M]//SIM J S,NAKAI S,GUENTER W.Egg Nutrition and Biotechnology.Wallingford,UK:CABI Publishing,1999:473–476.

[6] GAO G H,CHEN J D.Effects of dietary zinc on free radical generation,lipid peroxidation,and superoxide dismutase in trained mice[J].Achieves of Biochemistry and Biophysics,1991,291(1):147-153.

[7] 王洪阳,任战军,赵泮峰,等.铜、锰对断奶獭兔生产性能和血清生化指标的影响[J].西北农业学报,2012,21(3)27–31,37.

[8] 王淑梅,王安.饲粮中锰水平对育成期蛋鸭血液生化指标和血清 MnSOD 活性的影响[J].饲料工业,2006,27(14):38–41.

[9] 潘翠玲,黄克和,赵玉鑫,等.不同硒源和水平对蛋鸡血硒含量及抗氧化能力的影响[J].南京农业大学学报,2008,31(2):91–96.

[10] 江书忠,潘中勉,黄飞若,等.有机微量元素和饲料抗氧化剂对肥育猪生长性能、肉品质和

抗氧化能力的影响[C]//第六次全国饲料营养学术研讨会论文集.北京:中国畜牧兽医学会,2010.

[11] AMMERMAN C B.Methods for estimation of mineral bioavailability[M]//AMMERMAN C B,BAKER D H,LEWIS A J.Bioavailability of Nutrients for Animals:Amino Acids,Minerals,and Vitamins.San Diego,Ca:Academic,1995:83–94.

[12] 谭会泽,冯定远,陈平光,等.有机微量元素对母猪血液生化和激素水平影响的研究[C]//猪营养与饲料研究进展——第四届全国猪营养学术研讨会论文集.北京:中国畜牧兽医学会,2003.

Effects of Inorganic and Organic Complex Trace Elements at Different Levels on the Plasma Antioxidant Activities of Laying Hens

XUE Ying DONG Xiaofang* TONG Jianming

(*Institute of Animal Science*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100193, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of inorganic and organic complex trace elements at different levels on the plasma antioxidant activities of laying hens. Nine hundred and ninety 22-week-old *Beijing* Red No.1 laying hens were randomly allocated to 11 groups with 6 replicates per group and 15 hens per replicate. Group 1 was control group. Experimental groups =were fed the basal diets supplemented inorganic （groups 2 to 6） and organic complex trace elements （groups 7 to 11） at 25%, 50%, 75%, 100% and 125% of requirements NRC (1994) recommended, respectively. Mn, Fe, Zn, Se were referenced at laying hen requirements of NRC (1994) recommended, while Cu was referenced for broiler. The experiment lasted for 24 weeks. The results showed as follows: 1) inorganic complex trace elements at 75%, 100% and 125% of requirements NRC recommended significantly increased the activity of total superoxide dismutase

* Corresponding author, associate professor, E-mail: xiaofangd1124@sina.com

(T-SOD) in plasma of laying hens ($P<0.01$), inorganic complex trace elements at 100% and 125% of requirements NRC recommended significantly increased the activity of glutathione peroxidase (GSH-Px) in plasma ($P<0.01$), inorganic complex trace elements at 125% of requirement NRC recommended significantly increased the total antioxidant capacity (T-AOC) in plasma at weeks 8 and 24 ($P<0.01$), and inorganic complex trace elements at 75%, 100% and 125% of requirements NRC recommended significantly decreased the content of malonaldehyde (MDA) in plasma at week 16 ($P<0.01$). 2) Organic complex trace elements at all levels significantly increased the T-AOC in plasma of laying hens at week 8, the activity of T-SOD at weeks 4, 8 and 16 and the activity of GSH-Px at week 16 ($P<0.01$), and organic complex trace elements at 50%, 75%, 100% and 125% of requirements NRC recommended significantly decreased the content of MDA in plasma at weeks 4 and 16 ($P<0.01$). 3) At 75% of requirement NRC recommended, the T-AOC at week 8 and the activity of GSH-Px at weeks 16 and 24 in plasma of organic groups were significantly higher than those of inorganic groups ($P<0.05$). At 125% of requirement NRC recommended, the activity of T-SOD at week 16 in plasma of organic groups was significantly higher than that of inorganic groups ($P<0.05$). In conclusion, it is benefit to increasing the plasma antioxidant activities that the levels of inorganic and organic complex trace elements supplemented in diet of laying hens are beyond 75% inorganic complex trace element and 25% and 50% organic complex trace elements of requirements NRC recommended. At 75% and 125% of requirements NRC recommended, organic complex trace elements are better than inorganic complex trace elements on antioxidant activities of laying hens.

Key words: inorganic trace element； organic trace element； laying hens； antioxidant activities